

CO₂-Reduktionspotential solarer Nahwärmesysteme

von Rainer Tepe

Überblick

Ökobilanzen für Systeme und Produkte unterschiedlicher Art haben in den letzten Jahren aufgrund der Diskussion um die Klimafähigung durch treibhausrelevante Gase erheblich an Bedeutung gewonnen. Untersuchungen bezüglich der charakteristischen Kennwerte energetische Amortisationszeit und Erntefaktor haben ergeben, daß solare Kollektoranlagen zur Schonung unserer Umwelt erheblich beitragen können. Die Analysen zur Ökobilanzierung bedürfen allerdings größter Sorgfalt, da die Verfahren für und die verfügbaren Daten über die materialbezogenen Primärenergieaufwendungen ein erhebliches Fehlerpotential beinhalten.

Ecological balances for systems and products attract increasingly interest because of the discussion about climate change caused by anthropogenic greenhouse gas emissions. Investigations into energy payback time and yield have shown that solar thermal systems can contribute considerably towards protecting our environment. But, because methodologies are approximate and data bases are not precise, ecological balances must be discussed with caution.

1. Einleitung

Die zunehmende Belastung unserer Umwelt durch die Verbrennung fossiler Energieträger – Begriffe wie Konferenzen von Rio und Kyoto, Treibhauseffekt u. a. stehen als Synonym für die weitverbreitete Diskussion dieser Problematik – haben in weiten Kreisen den Ruf nach umwelt- und ressourcenschonenden Energieversorgungstechniken laut werden lassen, ohne daß sich in den letzten Jahren eine erkennbare Tendenz zum Umdenken herauskristallisiert hat. In diesem Umfeld unterliegen die regenerativen Energietechniken einer sehr kritischen Begutachtung hinsichtlich ihrer Wirksamkeit zur Vermeidung bzw. Minderung klimarelevanter Emissionen, wobei derzeit das Hauptaugenmerk auf den Ausstoß von Kohlendioxid CO₂ gerichtet ist.

Es ist also die Frage zu beantworten, wie groß der Beitrag regenerativer Energietechniken zur Senkung der CO₂-

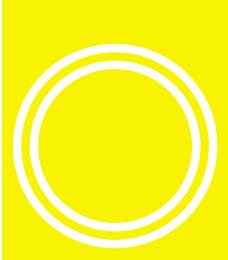
Emissionen ist. Nachfolgend werden die Ergebnisse mehrerer Untersuchungen zur Erstellung von Ökobilanzen für verschiedene Konzepte solarthermischer Anlagen vorgestellt und ihr Beitrag zur Vermeidung von CO₂-Emissionen quantifiziert.

2. Verfahren und Kenngrößen der Ökobilanzierung

Das Potential eines Energiesystems zur Ressourcen- und Klimaschonung kann anhand des kumulierten Primärenergieaufwands (KPEA) bewertet werden. Mit dem KPEA werden alle während der Lebensdauer eines Energiesystems anstehenden Energieaufwendungen, sowohl für die Herstellung als auch für den Betrieb und die Entsorgung, beschrieben. Weitere Beurteilungsgrößen sind die energetische Amortisationszeit (AZ), i. e. die Zeitspanne, in der der Ertrag eines Energiesystems genauso groß ist wie sein KPEA, und der primärenergetische Gesamterntefaktor (GEF), i. e. das Verhältnis von Gesamt Nettoenergieerzeugung zu KPEA. Hieraus können die CO₂-äquivalenten Emissionen eines Energiesystems abgeleitet und auch weitere Emissionsgase, gewichtet entsprechend ihrer Wirksamkeit auf den Treibhauseffekt, berücksichtigt werden.

Zur Ermittlung des KPEA eines Energiesystems bieten sich zwei verschiedene Methoden an: Einmal die Prozeßkettenanalyse (PKA) und zum anderen die aus der Volkswirtschaftslehre abgeleitete Input-Output-Analyse (IOA). Die Vorgehensweise bei der PKA beinhaltet die systematische Erfassung des in sämtlichen Prozeßstufen zur Herstellung eines Produkts aufgewendeten Energiebedarfs in Form der eingesetzten Energieträger, aus der sich der KPEA durch Aufsummierung der direkten Energieaufwendungen aller Prozeßstufen ergibt. Der Analyseaufwand für dieses Verfahren kann aufgrund weit verzweigter Prozeßketten, die sich z. B. durch Vorprodukte, Halbzeuge oder Dienstleistungen ergeben, aufwendig sein, jedoch liefert die Methode bei sorgfältiger Durchführung sehr verlässliche Resultate.

Der in [Abbildung 1](#) dargestellte Materialstammbaum für einen Flachkollektor



tor veranschaulicht den Aufwand und den Detaillierungsgrad für die Durchführung der PKA. Ausgehend vom Endprodukt erfolgt eine Unterteilung in Baugruppen, Bauteile, Werkstoffe und Halbzeuge, usw., bis hin zum Abbau der Rohstoffe in der Lagerstät-

te. Für jeden dieser einzelnen Prozeßschritte müssen die materialbezogenen Primärenergieverbräuche sowie die dazugehörigen Verarbeitungsschritte möglichst exakt bestimmt und am Ende in die Gesamtbilanz aufgenommen werden.

Die IOA beruht auf einer Verknüpfung der sogenannten Input-Output-Tabelle mit der Energieaufwendungsmatrix einer Volkswirtschaft. Die wirtschaftliche Verflechtung einer Volkswirtschaft in monetären Wertströmen der verschiedenen Sektoren wird in Beziehung gesetzt zu den jährlichen Energieverbräuchen in Form der verschiedenen Energieträger der einzelnen Wirtschaftsbereiche. Ein modifiziertes Verfahren ermöglicht, auch die vorgelegerten Energieaufwendungen einzu beziehen. Letztendlich kann der KPEA auch relativ schnell und einfach direkt über den Preis eines Produktes ermittelt werden [1]. Den Vorteilen dieses Verfahrens stehen gegenüber, daß die eindeutige Zuordnung eines Erzeugnisses zu einem bestimmten Wirtschaftssektor schwierig ist, und daß die erforderlichen Statistiken erst einige Jahre später verfügbar sind; dies kann zu relativ ungenauen Ergebnissen führen.

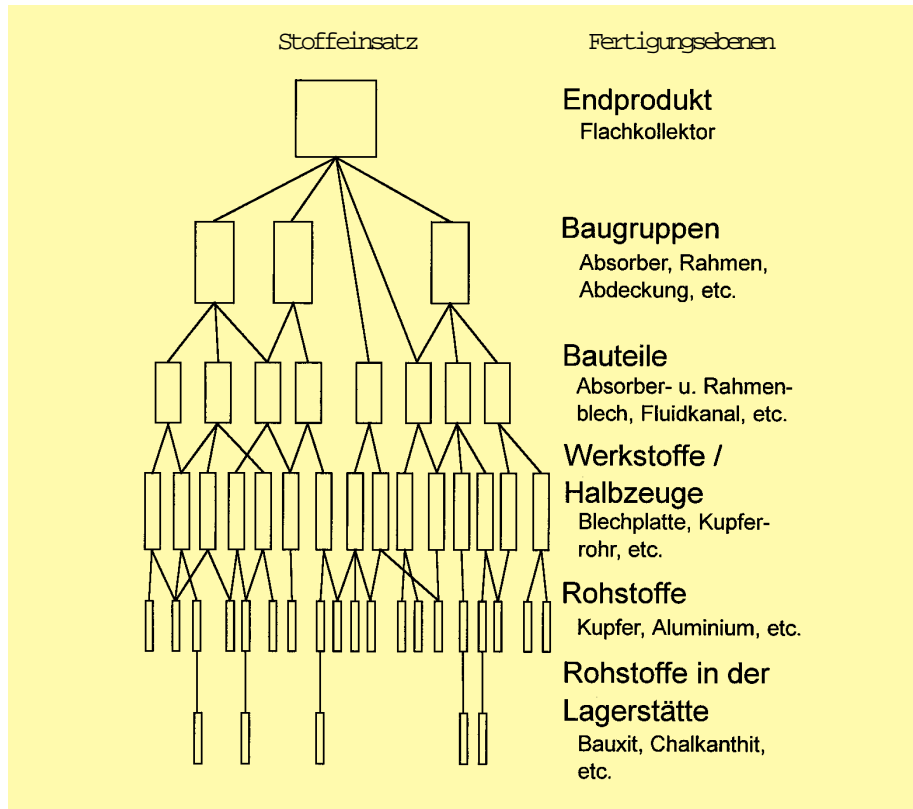
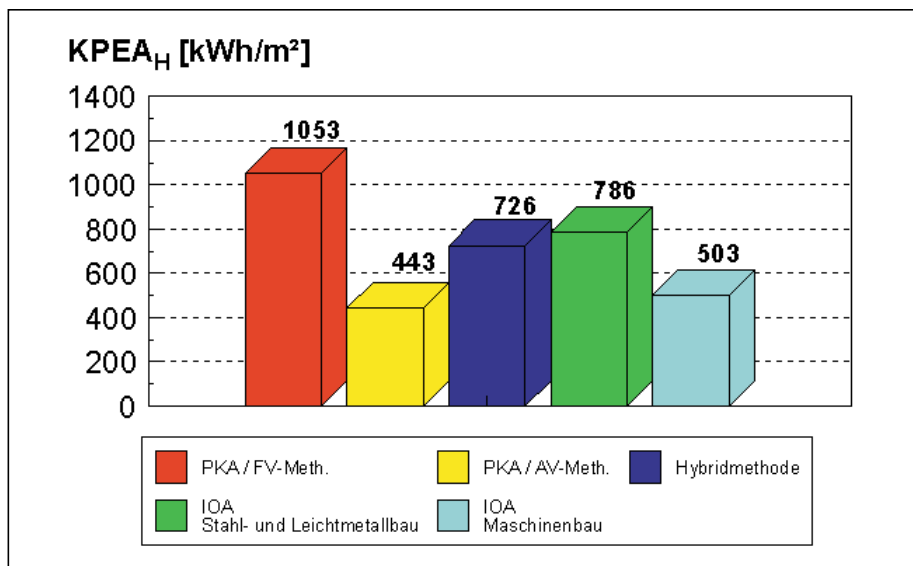


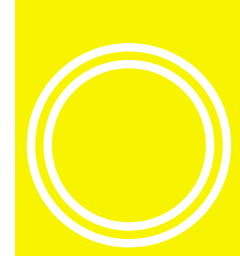
Abbildung 1: Materialstammbaum für die Prozeßkettenanalyse eines Flachkollektors

Abbildung 2: Ergebnisvergleich verschiedener Verfahren zur Bestimmung des kumulierten Primärenergieaufwandes KPEA für die Herstellung eines selektiven Flachkollektors



Am Institut für Thermodynamik der Universität Hannover führten Untersuchungen zur Bestimmung des KPEA von Sonnenkollektoren unter Anwendung der verschiedenen Verfahren zu sehr unterschiedlichen Resultaten [2]. **Abbildung 2** zeigt die Ergebnisse für einen selektiven Flachkollektor. Die PKA/FV-Methode beinhaltet einen Verarbeitungsfaktor, mit dem die materialbezogenen Energieaufwendungen multipliziert werden; die PKA/AV-Methode berücksichtigt einen Verarbeitungsaufschlag, der in die Addition einfließt, wobei etwas modifizierte Daten für die Materialaufwendungen herangezogen wurden.

Die IOA-Methoden unterscheiden sich hinsichtlich der Zuordnung in bestimmte Wirtschaftssektoren, während die Hybridmethode eine Kopplung von PKA und IOA ist. Aufwandsmäßig ist das kombinierte Verfahren die geeignetste Methode; sie basiert auf einer PKA, soweit diese in vertretbarem Rahmen möglich ist und zu relativ genauen Ergebnissen führt, und auf der Anwendung der IOA, sofern einzelne Bauteile oder Komponenten eindeutig einem Wirtschaftssektor zugeordnet werden können. Da die Hybridmethode die Vorteile beider Verfahren vereint, wurde sie auch für alle Folgeuntersuchungen angewandt.



3. Analyse solarthermischer Kleinanlagen

In einem ersten Schritt zur Öko-Bilanzierung von thermischen Solaranlagen im Ein- und Mehrfamilienhausbereich wurden möglichst genaue Daten für die einzelnen Komponenten anhand des beschriebenen Hybrid-Verfahrens ermittelt und die Kennwerte für Anlagen verschiedener Konfiguration (Einsatz verschiedener Flach-, Vakuumröhren- und Vakuumflachkollektoren) mit solaren Deckungsgraden im Bereich zwischen 30% und 75% der Warmwasserlast bestimmt.

Abbildung 3 zeigt beispielhaft die energetische Amortisationszeit solarer Brauchwasseranlagen in Abhängigkeit der solaren Deckungsrate. Systeme mit Selbstbaukollektoren, relativ ungünstig schneiden Anlagen mit Vakuumflachkollektoren ab. Die Untersuchungen ergeben auch, daß die niedrigsten Amortisationszeiten bei solaren Deckungsgraden um 60% liegen.

4. Analyse solarthermischer Großanlagen

In einer weiteren Untersuchung wurden verschiedene Konzepte solarthermischer Großanlagen, wie sie in den letzten Jahren in Deutschland installiert wurden, analysiert.

Die auf dem Dach des Heizkraftwerks der Stadtwerke Göttingen AG installierte 785 m² große Flachkollektoranlage hat eine einfache Systemtechnik, da keine Speicherung der Wärme notwendig ist. Wegen der hohen Netzrücklauftemperaturen, die zu verminderten Solarerträgen geführt haben, beziehen sich die in Abbildung 4 dargestellten Werte für die energetische Amortisationszeit auf die aus der TRN-SYS-Simulation ermittelten Ergebnisse, die für $t_{NRL} = 70^\circ\text{C}$ mit den tatsächlichen Erträgen nahezu übereinstimmen [3]. Der KPEA-Wert für das System beträgt 791,5 kWh/m² und liegt damit deutlich besser als für Anlagen zur Warmwasserbereitung.

Solare Nahwärmesysteme mit saisonalem Wärmespeicher zur Wärmeversorgung großer Wohnsiedlungen, wie sie

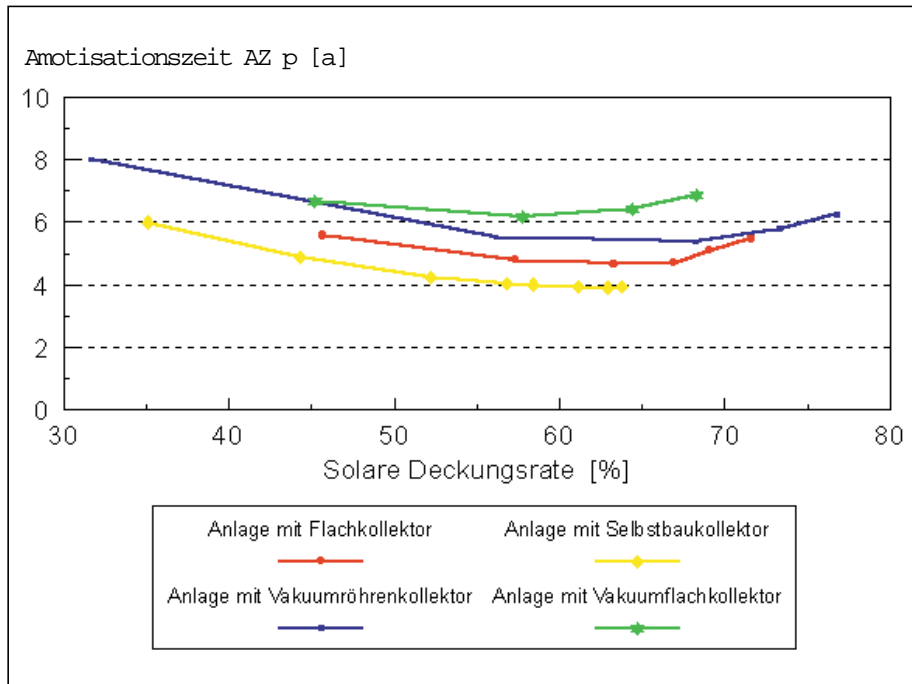
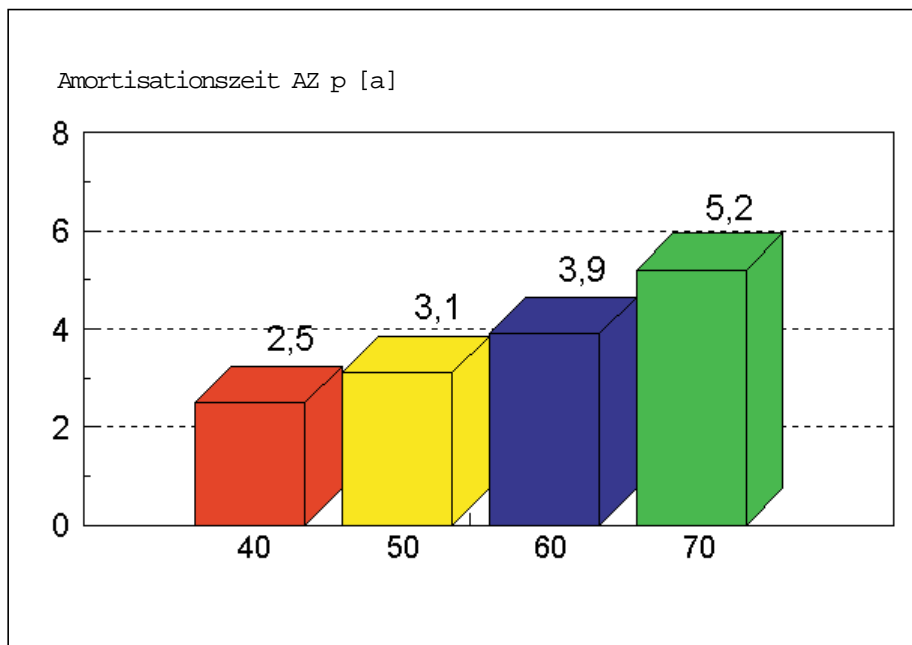


Abbildung 3: Energetische Amortisationszeit AZp solarer Brauchwasseranlagen mit unterschiedlichen Solarkollektoren

Abbildung 4: Energetische Amortisationszeit des solaren Nahwärmesystems in Göttingen in Abhängigkeit von der Netzrücklauftemperatur



im letzten Jahr in Friedrichshafen und Hamburg entstanden sind [4], ermöglichen solare Deckungsgraden um 50 %, obwohl eine vollständige Deckung technisch hätte realisiert werden können. ISFH führte Voruntersuchungen für eine zur EXPO 2000 geplanten Wohnsiedlung mit etwa 370 Wohneinheiten und einer solaren Nahwärmeversorgung mit Langzeitwärmespei-

cher durch. Mit MINSUN-Simulationen wurden verschiedene Systeme mit Varianten eines Erdbeckenspeichers und einer solaren Deckungsrate von 50 % bis 100 % ökologisch bilanziert [5].

Die Primärenergieaufwendungen wurden für die Komponenten des solaren Nahwärmesystems und einer solaren Deckungsrate von etwa 72 % ermit-

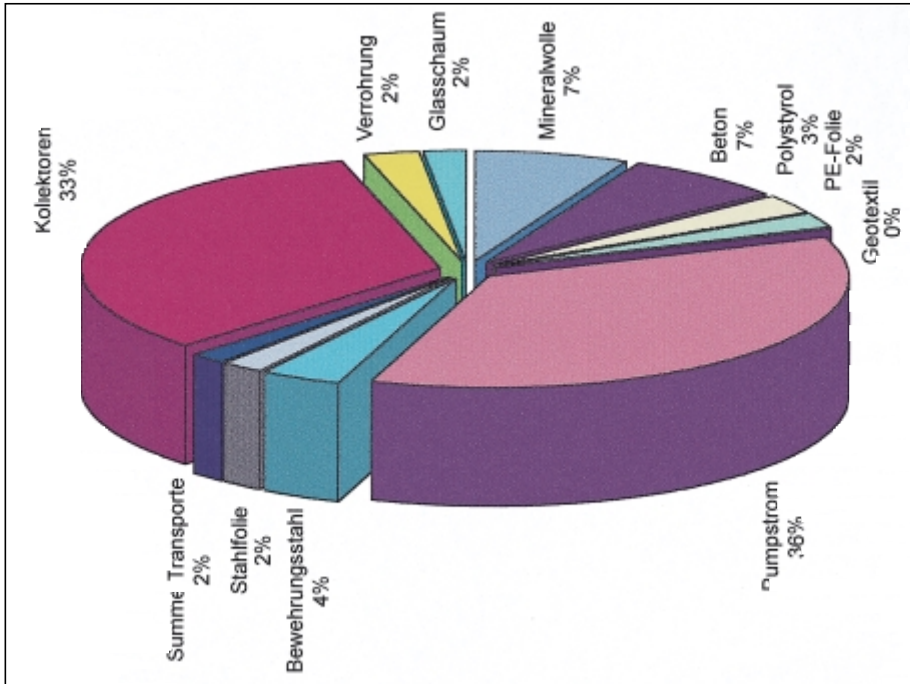
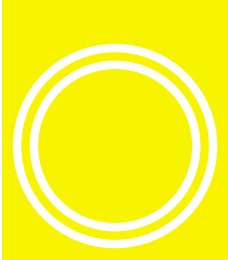
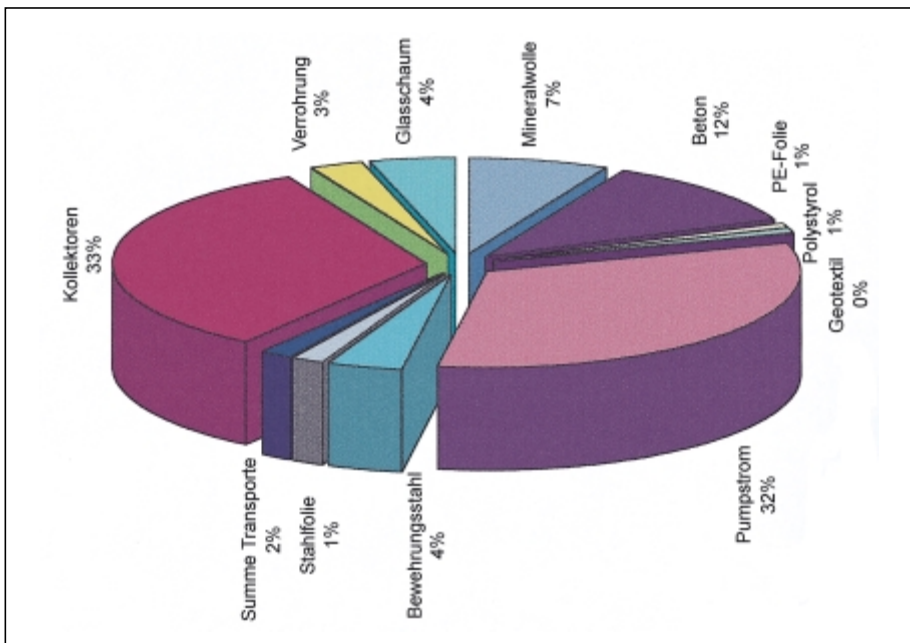


Abbildung 5: Anteiliger kumulierter Primärenergieaufwand KPEA der Komponenten eines solaren Nahwärmesystems mit Beton-Erdbeckenspeicher

Abbildung 6: Relativer Beitrag der Komponenten eines solaren Nahwärmesystems mit Beton-Erdbeckenspeicher zur gesamten CO₂-Emission



telt (Abbildung 5). Anteilig tragen die Kollektoren, der Speicher und der für die Nutzung erforderliche Pumpstrom zu jeweils etwa einem Drittel zu den Primärenergieaufwendungen und den daraus resultierenden CO₂-Emissionen bei. Dabei wurde der Primärenergieaufwand für den Pumpstrombedarf mit 3 % des Solaranlagenertrags relativ hoch angesetzt, so daß der KPEA

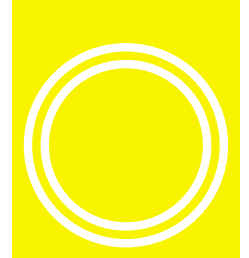
des Gesamtsystems bei realen Anlagen geringer ausfallen wird. Die Anteile für den Langzeitwärmespeicher beziehen sich auf einen Betonspeicher, der mit dem realisierten Speichers in Friedrichshafen im wesentlichen übereinstimmt; ein Erdbeckenkonzept aus Stahlkonstruktion würde die Anteile erhöhen und auch absolut einen höheren KPEA aufweisen.

Die Analyse der durch die Primärenergieaufwendungen verursachten CO₂-Emissionen verdeutlicht [Abbildung 6](#). Im Vergleich zu den Primärenergieaufwendungen in [Abbildung 5](#) ergeben sich nur unwesentliche Unterschiede in den Anteilen der Systemkomponenten.

Der Einfluß unterschiedlicher solarer Deckungsraten auf die Kennwerte energetische Amortisationszeit AZp und Gesamterntefaktor GEFp läßt sich [Abbildung 7](#) entnehmen. Die AZp ergeben sich aus dem Schnittpunkt der Solaranlagenlinien der verschiedenen Varianten mit der Linie des Referenzsystems (mit einem Kreis markiert) und liegen zwischen 4 und 4,5 Jahren für Deckungsraten von 50 bis 100 %. Der GEFp ergibt sich aus dem Verhältnis der Strecken zwischen den rot markierten Buchstaben, z. B. für die Solaranlage mit 50 % Deckungsrate aus der Division der Strecken AB zu AC (Wert etwa 1,5), und bei vollständiger solarer Versorgung aus dem Verhältnis der Strecken AB zu AD (Wert etwa 3). Somit ergibt sich, daß ein solares Nahwärmesystem mit Langzeitwärmespeicher und 100 %-iger Deckungsrate während einer 20-jährigen Nutzungsdauer etwa dreimal soviel Energie bereitstellt, wie für seine Herstellung und den Betrieb benötigt werden.

[Abbildung 7](#) veranschaulicht, daß die energetische Amortisationszeit gegen Anlagen mit hoher solarer Deckungsrate spricht, die Gesamtfaktoren hingegen deutliche Vorteile für diese Anlagenauslegung aufweisen. Dies bestätigt auch die Analyse des CO₂-Reduktionspotentials in Abhängigkeit der solarer Deckungsrate ([Abbildung 8](#)). Entsprechend der Zunahme der Kollektorflächen und der Speichervolumina steigen die CO₂-Emissionen für die Herstellung, den Betrieb und die Nachheizung nahezu linear an, die vermiedenen Emissionen steigen aber ebenfalls kontinuierlich an und erreichen ihren Maximalwert bei vollständiger solarer Deckungsrate.

Aus den Ergebnissen der Untersuchungen läßt sich also ableiten, daß solare Nahwärmesysteme mit saisonalem Wärmespeicher und hoher solarer Deckungsraten anzustreben wären unter dem Gesichtspunkt



größtmöglicher Einsparung fossiler Energieträger und Minimierung der CO₂-Emissionen. Allerdings bedarf

diese Schlußfolgerung noch einer Relativierung unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Gesichtspunkte.

5. Zusammenfassung

Die durchgeführten Analysen bestätigen, daß solarthermische Kollektoranlagen aus primärenergetischer Sicht einen erheblichen Beitrag zur Minderung der CO₂-Emissionen leisten können. Hohe solare Deckungsraten solarer Nahwärmesysteme sind unter dieser Zielsetzung erstrebenswert, führen aber nicht zu einer Minderung der energetischen Amortisationszeiten. Bei niedrigen Netzrücklaufemperaturen erzielen solare Nahwärmesysteme die geringsten energetischen Amortisationszeiten, z. B. in Göttingen von etwa 2,5 Jahren.

Kosteneinsparungen könnten sich bei solaren Nahwärmesystemen künftig z. B. durch die Integration in Kollektordachelemente ergeben. In Bezug auf die Wärmespeicher verursachen Aquifere und Felskavernen die geringsten spezifischen Kosten, lassen sich aber wegen der geologischen Verhältnisse in Deutschland nur selten realisieren.

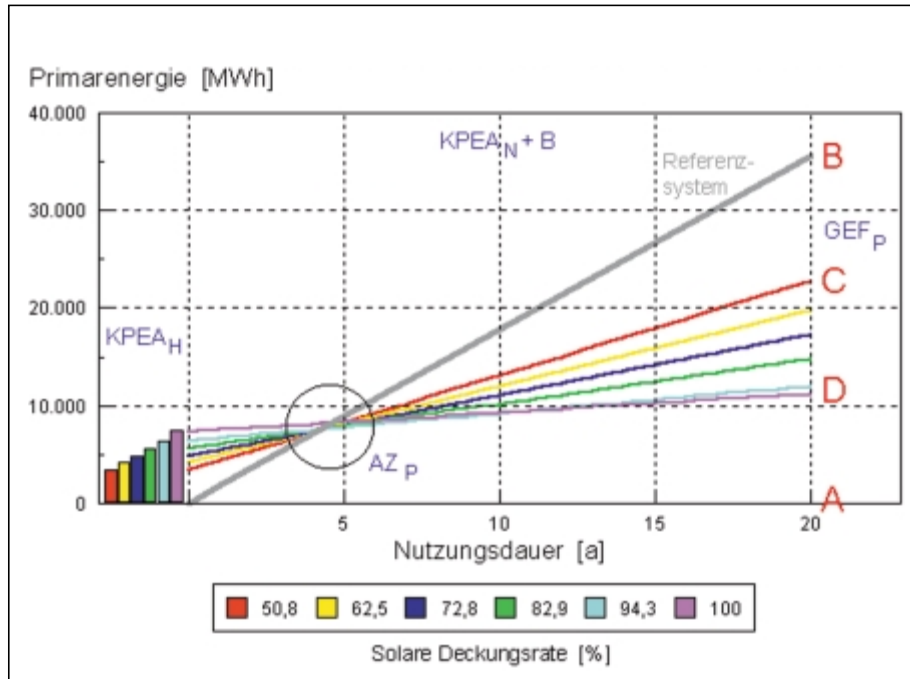
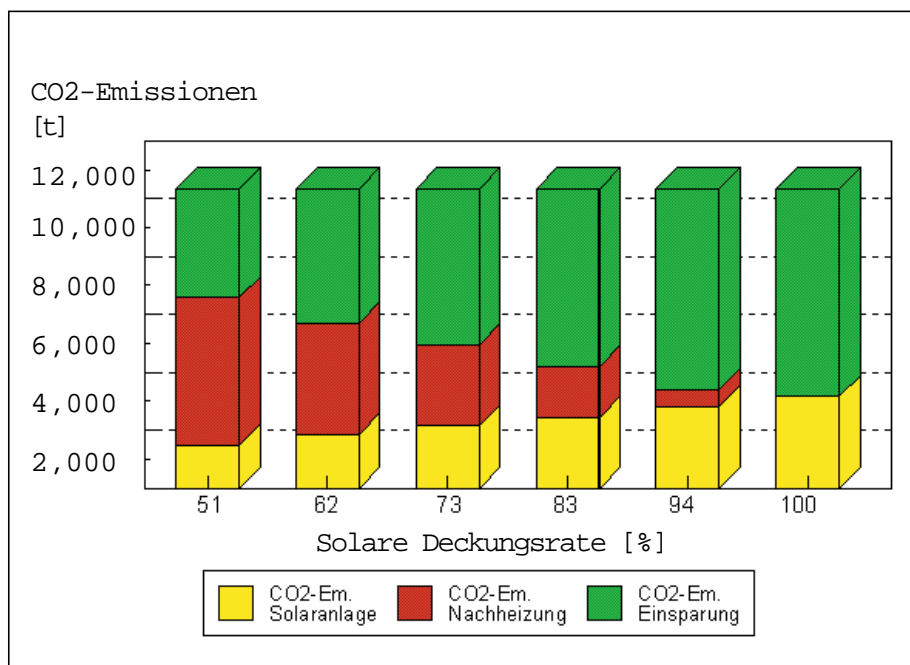


Abbildung 7: Energetische Amortisationszeit AZ_p und Gesamterntefaktor GEF_p für solare Nahwärmesysteme mit saisonalem Wärmespeicher in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer und solaren Deckungsrate. Im ersten Bereich des Diagramms sind die Primärenergieaufwendungen für die Herstellung, im zweiten Bereich die jährlichen Zunahmen der Primärenergieaufwendungen durch Anlagenbetrieb und konventionelle Nachheizung dargestellt. Die graue Linie bildet das auf Verbrennung von Erdgas basierende Referenzsystem, für das der kumulierte Primärenergieaufwand für die Herstellung vernachlässigt wurde.

Abbildung 8: CO₂-Reduktionspotential solarer Nahwärmesysteme mit saisonalem Wärmespeicher in Abhängigkeit von der solaren Deckungsrate



Literatur

- [1] F.D. Drake
„Kumulierte Treibhausgasemissionen zukünftiger Energiesysteme“, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg (1996)
- [2] A. Bode
„Bestimmung des kumulierten Energiebedarfs von Solarkollektoranlagen“, Studienarbeit, Institut für Thermodynamik der Universität Hannover (1994)
- [3] R. Tepe, K. Vanoli
„Einbindung von Sonnenenergie in die Nahwärmeversorgung der Stadtwerke Göttingen AG“, BMBF-Abschlußbericht, Emmerthal 1996
- [4] M.N. Fisch, R. Kübler, M. Benner
„Solare Nahwärme – von der Idee zur Realisierung“, Tagungsband 6. Natl. Symp. Therm. Solarenergie, Staffelstein (1996)
- [5] O. Clemm
„Bestimmung des kumulierten Energiebedarfs von solaren Nahwärmesystemen mit saisonalem Wärmespeicher“, Studienarbeit, Institut für Thermodynamik der Universität Hannover (1997)